



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtq.2016.03.021

钱程, 武雄, 穆文平, 等. GIS 技术在水文地质领域的应用进展[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(3): 115-122, 131. QIAN Cheng, WU Xiong, MU Wen ping, et al. Application advances of GIS in hydrogeology field [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(3): 115-122, 131. (in Chinese)

GIS 技术在水文地质领域的应用进展

钱程¹, 武雄¹, 穆文平², 朱阁¹

(1. 中国地质大学(北京) 水资源与环境学院, 北京 100083; 2. 中国矿业大学(北京) 地球科学与测绘工程学院, 北京 100083)

摘要: 地理信息系统(GIS)是水文地质研究的一个重要工具,地理信息系统在水文地质领域的应用是水文地质研究的热点之一。在总结近年来国内外大量相关研究成果的基础上,从基于GIS的地下水资源评价、地下水资源管理、地面沉降、地下水水质评价及污染物分析、水文地质调查、地下水保护,以及GIS与数值模拟技术的结合等方面介绍了地理信息系统在水文地质领域的最新应用,提出了GIS在水文地质领域应用存在的问题,并对今后GIS在水文地质领域的应用进行了展望。指出,今后应加强GIS与地下水模型及分布式水文模型的集成、基于GIS的地下水系统仿真三维或四维可视化、网络GIS技术的应用,以及流域水资源综合管理评价系统的建立等方面的研究。

关键词: GIS; 水文地质; 水资源评价; 地面沉降; 数值模拟

中图分类号: P345 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2016)03-0115-08

Application advances of GIS in hydrogeology field

QIAN Cheng¹, WU Xiong¹, MU Wen ping², ZHU Ge¹

(1. School of Water Resource and Environment, China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China;

2. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: Geographic Information System (GIS) is an important tool for hydrological geology research, and its application in hydrogeology field is one of the hot issues in groundwater research. The latest application of GIS to groundwater was introduced from seven aspects: groundwater resources evaluation, groundwater resources management, land subsidence, groundwater quality evaluation and pollutants analysis, hydrogeology survey, groundwater protection, and the combination of GIS and numerical simulation technology. At the same time, problems of GIS application in the field of hydrogeology were presented, and the development of GIS in hydrogeology field was discussed. In the future, what should be strengthened includes the integration of GIS and groundwater model and distributed hydrological model, the visualization of 3D or 4D groundwater system based on GIS, the application of web GIS technology and the establishment of comprehensive systems for water resources management and evaluation in a basin.

Key words: GIS; hydrogeology; water resources evaluation; land subsidence; numerical simulation

地理信息系统(GIS)是以计算机硬件为基础, 结合专业软件,对地理空间数据进行获取、编辑、存

收稿日期: 2015-11-28 修回日期: 2016-04-10 网络出版时间: 2016-05-05

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20160505.1136.018.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41172289); 国家科技支撑计划课题(2012BAJ11B04); 中央高校基本科研业务费专项资金(2652015125)

Fund: National Natural Science Foundation of China (41172289); The National Key Technology R&D Program(2012BAJ11B04); Fundamental Research Funds for the Central Universities (2652015125)

作者简介: 钱程(1989-),男,湖北浠水人,博士研究生,主要从事地下水数值模拟研究。E-mail: qiancheng0121@126.com

通讯作者: 武雄(1973-),男,内蒙古人,教授,博士,主要从事水文地质与工程地质研究。E-mail: wuxiong@cugb.edu.cn

储、查询、计算、管理、制图显示、应用分析等处理的综合性技术。自 1963 年加拿大科学家 R. F. Tomlinson 首次建立用于自然资源管理和规划的地理信息系统以来, GIS 技术已经广泛应用于国土资源管理、土木工程、森林科学、城市规划、海洋科学、遥感与测量等各个领域^[1]。从 20 世纪 90 年代开始, 地理信息系统(GIS) 广泛应用于水文地质领域的各方面研究, 主要包括: 基于 GIS 的地下水资源评价、地下水资源管理、地面沉降研究、地下水水质评价及污染物分析、水文地质调查、地下水保护, 以及 GIS 与数值模拟技术的结合等。

1 水文地质领域的 GIS 应用研究

1.1 基于 GIS 的地下水资源评价

由于具有超强空间分析功能, GIS 已发展成为地下水资源评价方面的一个非常有效的必备工具。国内外众多学者应用 GIS 技术对不同研究区进行了地下水资源评价研究。国内方面, 曹炳媛等^[2]利用基于 MapObject 的河西走廊水文地质信息系统(HXSIS) 实现了河西走廊黑河中游地下水资源评价及合理配置与 GIS 的有机结合; 马明等^[3]运用 GIS 技术研究了通州区某典型区域地下水超采程度和采补平衡趋势; 降亚楠等^[4]将基于水均衡原理的地下水资源评价方法和程序与 GIS 技术结合, 在 SuperMap 软件平台上开发了宝鸡峡灌区地下水资源评价系统; 地下水埋深是地下水资源评价的重要参数, 殷嘉霖^[5]利用 ArcGIS 等软件, 应用统计学方法, 建立了西吉县葫芦河流域地下水埋深的统计模型和地下水空间预报体系; 水均衡分析是地下水资源评价的主要方法之一, 王亚鑫^[6]通过对 GIS 进行二次开发, 基于 ArcGIS Engine 设计开发了地下水均衡研究系统, 并进行了实例研究。

在国外, Portoghesi^[7]开发了一个 GIS 系统工具, 用来分析评价半干旱环境区域尺度的地下水均衡, 并应用于意大利南部的海岸区; Poulsen 等^[8]根据大量区域水文和水化学数据, 结合 GIS 技术与专家系统软件分析了澳大利亚 Bremer 流域的地下水位时空动态变化; Awawdeh 等^[9]集成 GIS 技术和遥感技术得出了约旦东北部 Tulul al Ashaqif 区的地下水资源潜力等级图。国内外 GIS 在地下水资源评价方面的应用使地下水资源评价朝着集成化、系统化、信息化发展, 因此评价工作变得方便、快捷。

1.2 基于 GIS 的地下水资源管理

在地下水资源管理方面, GIS 主要应用于地下

水资源开采与规划、地下水与地表水的联合调度研究、地下水资源管理与决策系统的开发。

在地下水资源管理与决策系统方面, 李门楼等^[10]基于 Arcview 平台开发了河北平原区域地下水资源决策支持系统, 实现了对地下水资源进行管理和决策; 兰瑞^[11]为改善和提高城市地下水资源的管理水平, 研究设计了基于组件式 GIS 的太原市地下水资源管理信息系统; Dawoud 等^[12]针对尼罗河西部地下水含水系统, 开发了一个基于 GIS 的地下水管理模型, 为地下水资源的高效集成和可持续管理提供了支持; 孙颖^[13]在地理信息系统组件(Map Objects) 基础上开发了基于组件式 GIS 技术的北京市地下水管理系统, 实现了地下水空间分析模型与地理信息系统之间的有机集成; 周念清^[14]利用 MapInfo 的二次开发工具 MapBasic 开发了包括降水分析子系统、地表水子系统、地下水子系统及地质灾害子系统的徐州市地下水资源管理信息系统; 宫辉力等^[15]将地理信息系统技术与地下水管理相结合, 设计、开发了地下水地理信息系统, 并应用该系统建立了黄河流域地下水管理系统和北京市地下水信息分析与管理信息系统; 全琴^[16]采用面向对象的 JAVA 语言、可扩展的 ORACLE 数据库以及 ARCGIS 平台开发了一套完整的、可视化的地下水资源管理系统; 叶剑锋^[17]利用 ComGIS 技术成功建立了基于混合系统架构的南疆地下水资源管理系统, 为 GIS 在地下水资源管理中应用提供了新的开发形式。上述信息系统或管理模型的建立, 提高了地下水资源管理的工作效率和信息化水平。

在地下水资源开采与规划方面, 谈梦月^[18]将 GIS 技术应用于晋江市浅层地下水功能区划研究, 为地下水的开采规划提供技术支持。为减小地下水资源开采成本, Khodaei 等^[19]利用遥感和 GIS 技术在半干旱区寻找具有开采潜力的目标区; Galef^[20]利用 GIS 收集和分析数据, 针对加利福尼亚洪堡特县蓝湖含水层建立模拟模型, 对地下水抽水方案进行了优化研究。

地下水与地表水联合调度是水资源管理的一个重要内容, GIS 已经成为解决这一问题的有效手段。Sarwar 和 Eggers^[21]利用 GIS 处理建模所需的空数据, 并建立了地表水与地下水联合模型, 用于评价不同的调度方案对地下水位的影响; 尹莹^[22]利用 ArcGIS 对济南市平阴县的浪溪河流域地表水和地下水的相互作用进行了研究; 王中根等^[23]通过 GIS 平台将流域地表水 SWAT 与地下水 MODFLOW 模型进行耦合, 构建了海河流域地表水与地下水耦

合模型。这些研究为流域地表水与地下水联合调度与管理提供了科学依据和技术支撑。

1.3 基于GIS的地面沉降研究

随着GIS技术的发展, GIS在地面沉降研究中的应用也越来越普遍。王伟^[24]运用Mapinfo的二次开发工具Mapbasic建立了具有数据查询和可视化处理子模块的地面沉降可视化预测系统, 将GIS应用于地下水开采引起地面沉降的三维可视化研究; 于军^[25]基于ArcGIS平台建立了苏锡常地区地面沉降管理信息系统, 实现了对苏锡常地区地面沉降的科学监测和管理; 姜规模等^[26]利用数据库技术与GIS技术建立了西安市地面沉降与地下水位动态监测信息管理系统, 实现了地面沉降与地下水位动态监测的自动化管理; 焦道振等^[27]依托三维仿真技术和地理信息系统, 整合地面沉降监测资料和其它相关信息, 建立了地面沉降灾害监测信息管理系统, 实现了地面沉降调查监测信息的数据库管理; 王强^[28]利用时态GIS技术, 以ESRI Geodatabase为平台构建基于动态多级基态修正模型的地面沉降灾害时空数据库, 实现了地面沉降灾害时空数据一体化存储及地面沉降灾害的时空查询及回溯; Rahman等^[29]利用GIS软件的数据管理和空间分析等功能对Rafsanjan平原地下水开采引起的地面沉降进行了调查研究; 段学敏^[30]将GIS与模糊层次分析法(FAHP)相结合引入地面沉降危险性区划, 对河北省沧州地区地面沉降进行了危险性评价研究; Pradhan等^[31]利用GIS中的多元统计分析模型EBF对马来西亚Kinta谷地的地面沉降进行了敏感性分区研究。

1.4 地下水水质评价及污染物分析

GIS在地下水水质评价及污染物分析方面有着广泛的应用。在国内, 张永波等^[32]设计开发了基于GIS图形管理技术与时态监测数据库的地下水水质综合评价模型, 将广泛使用的地下水水质综合评价方法与GIS结合起来; 栗石军^[33]利用GIS技术结合DRASTIC模型对黄兴镇的地下水重金属污染进行了综合风险评价研究; 马雷等^[34]利用GIS强大的数据管理、空间分析和制图功能, 完成了基于Voronoi图和DTM的地下水化学类型空间分区图的制作与对比分析; 王存政等^[35]借助于GIS技术强大的输入、空间分析及制图功能, 对湛江市区浅层地下水防污性能进行了评价和分区; 黄金玉等^[36]将GIS应用于地下水污染分析评价中, 完成了长江三角洲地区地下水污染调查和分析评价; 吴金权^[37]以丰都雪玉

洞岩溶地下水环境评价数据库为基础, 以地下水环境评价模型体系为支撑, 以GIS技术为手段, 开发了基于GIS的岩溶地下水环境评价系统。在国外, Machiwal等^[38]基于GIS技术对印度西部的一个硬岩山区地下水进行了质量评价和分析, 给出了该区地下水质量指数(GWQI)分布图; Kantharaja等^[39]利用GIS技术软件平台ArcView对印度南部Shivani流域地下水中的氟离子浓度进行了空间分析; Sarda-Noori等^[40]采用水质指数(WQI)和GIS技术对伊朗Saveh Nobaran的地下水质量现状进行了研究, 分析了水质因子的空间分布规律。

1.5 GIS与水文地质调查

水文地质调查包括水文地质测绘、物探、钻探、水文地质试验、地下水动态观测、制图等工作, GIS在这些工作中的应用也是很常见的。周立新等^[41]为了使GIS技术在岩溶水文地质调查野外工作中发挥作用, 在MapGIS系统对数据进行处理和配准, 建立了工作区数据录入与分析平台, 在野外调查时及时录入调查数据并加以分析, 以提高工作效率; 耿杰哲等^[42]以山西王家岭矿区为例, 利用GIS强大的空间数据处理能力, 结合遥感数据与方法及其它资料得到了地表径流及矿区总体补径排关系, 为地形复杂区域的水文地质调查提供了技术支持。在制图技术方面, 王秀云等^[43]详细阐述了利用GIS技术制作专题图的数据处理、数据库构建等工艺流程, 并总结了利用GIS制图的特色之处; 任化准等^[44]将基于ArcGIS的插件CrossView引入到水文地质剖面图绘制, 结合ArcMap实现了图形数据和属性数据的关联, 提高了水文地质图的制图效率。GIS在地下水资源调查方面的应用主要是利用GIS制图并建立相应的数据库, 如水文地质基础资料、地下水动态观测资料、水文地质试验结果等数据库, 实现相应空间数据的可视化查询与检索。

1.6 基于GIS的地下水保护

地下水保护的科学研究主要涉及地下水脆弱性评价、水源地保护区划分、非点源污染调查与评价、地下水监测网优化与设计等方面, GIS在这些方面都有着广泛的应用。

在地下水脆弱性评价方面, 国内外学者多采用GIS技术结合DRASTIC模型或其改进模型对地下水脆弱性进行研究。李立军^[45]将GIS技术与DRASTIC评价指标体系结合, 建立了潜水MEQU-DRASTIC和承压水DAADCQ评价指标体系, 完成了通榆县地下水脆弱性评价; 张保祥等^[46]构建了基于熵权

与 GIS 耦合的 DRASTIC 地下水脆弱性模糊优选模型, 并利用该模型对山东半岛北部的黄水河流域地下水脆弱性进行了评价; Babiker 等^[47] 利用基于 GIS 的 DRASTIC 模型对日本中部岐阜市 Kakamigahara 高地含水层的脆弱性进行评价, 结果表明 DRASTIC 模型与 GIS 结合使用是地下水脆弱性评价的有效方法; Rahman^[48] 在 GIS 环境下使用 DRASTIC 模型研究了印度北部 Aligarh 城及其附近地区浅层地下水脆弱性分区, 得出了比较客观的结论。

在水源地保护区划分方面, GIS 也发挥着重要的作用。Siarkos 等^[49] 利用 Mapinfo 软件确定水源地保护区的边界, 并识别土地利用和农作物类型, 对水源地保护区划分方案的经济性进行了研究; Miller 等^[50] 采用 GIS 作为技术手段, 从保护区占据的面积角度比较分析了固定半径算法(CFR)与其它比较复杂的水源保护区划分方法的区别; 张保祥^[51] 在基于 GIS 的地下水脆弱性评价的基础上, 确定了黄水流域大堡和莫家两个地下水源地的三级保护区的范围。GIS 在水源地保护中的应用使水源地保护区数据的获取与管理实现信息化。

在非点源污染调查与评价方面, 蒋勇军等^[52] 在 GIS 支持下, 以小江典型岩溶农业流域为研究范围, 利用地下水水质数据及航片和 TM 影像, 研究了农业

面源污染与地下水水质时空变化的关系; 王明新等^[53] 建立了基于 GIS 的 BP 神经网络模型, 模拟分析了农业区浅层地下水硝酸盐氮含量及其空间分布特征; 金爱芳等^[54] 基于 GIS 技术和层次分析法, 建立了污染源特性指标评价与污染物属性指标评价的耦合模型; Candela 等^[55] 将 GIS 与 GLEAMS 结合开发出基于 GIS 的一维硝酸盐氮仿真模型, 对农业活动产生的地下水非点源污染进行了研究。

在地下水监测网优化与设计方面, 王红旗等^[56] 将 GIS 技术与 Topsis 优化方法和熵值权重法进行整合, 对地下水水源地现有监测井分布进行优化研究, 实现了地下水监测方案的可视化; 刘徽等^[57] 利用 GIS 技术编制了江汉平原地下水动态类型图, 并在此基础上按照监测点布设原则进行了地下水监测网的优化设计。

1.7 GIS 与地下水数值模拟的结合

1.7.1 基于 GIS 的地下水模拟软件

地下水模拟过程通常包含前处理、模型计算和后处理三个部分, GIS 在前处理和后处理中发挥着重要作用。随着 GIS 与计算机软件技术的发展, 越来越多的地下水模拟商业软件实现了与 GIS 不同程度的结合(表 1), 为地下水数值模拟研究提供了有效工具。

表 1 常用地下水数值模拟软件^[58-62]

Tab. 1 Common groundwater numerical simulation software

名称及最新版本号	开发者	应用领域	特点
PMWIN 8.042	Chiang 等	地下水流动与溶质运移、变密度流动、温度分布、抽水引起地面沉降模拟等	程序结构模块化, 离散方法简单化, 菜单可视化、网格加密, 功能强大
Visual MODFLOW Flex 2015.1	加拿大 Waterloo 水文地质公司	地下水流、溶质运移和反应运移, 海水入侵、地热异常、阳离子交换模拟等	功能强大同时易学易用, 菜单结构合理, 具有友好的可视化交互界面和强大的模型输入输出支持
FEFLOW 6.2	DHFWASY 公司	模拟地下水流动与溶质运移、变饱和和流动、变密度流动(海水入侵)、热量运移等	更精确的图形显示, 三维图形交互旋转, 有限元网络的自动生成和局部加细
GMS 10.0.10	美国 Brigham Young 大学和美国军队	地下水流模拟、溶质运移模拟、反应运移模拟, 建立三维地层实体	模块多, 功能全, 建模方便, 前后处理功能强, 三维可视化
Argus ONE 4.2.0w	美国地质调查局	与其它软件结合进行地下水流模拟、溶质运移模拟, 变饱和、变密度流模拟等	可以作为 MODFLOW、SUTRA、HST3D 等模拟软件的可视化平台 ^[61]
Arc Hydro Groundwater ^[62] 3.3.1	美国 ESRI 和 Aquaveo 公司	地下水流模拟, 管理地下水和地层数据	完全基于 ArcGIS 开发, 建模方便, 数据处理简化, 结果可视化

常用地下水数值模拟软件与 GIS 结合方式主要有三种^[58]: (1) GIS 平台中嵌入地下水模拟模型, 如 Arc Hydro Groundwater 中嵌入了 MODFLOW 模型; (2) GIS 功能嵌入到地下水模拟模型, 如 PMWIN、Visual MODFLOW / Visual MODFLOW Flex、FEFLOW 和 GMS 软件, 将插值计算、等值线

生成以及简单展示等 GIS 功能嵌入到模拟软件内部, 并通过 GIS 数据接口, 与 GIS 系统实现数据交换; (3) GIS 与地下水模拟模型的松散连接, 如 Argus ONE, 通过基于地理信息系统的用户界面(GUI), 为各类模拟软件提供便捷的数据前处理和后处理平台。

1.7.2 GIS在地下水数值模拟中的应用

GIS多以与专业软件或模型结合的方式应用于地下水数值模拟。宫辉力等^[63]将GIS与数值模拟技术相结合,模拟了浅层地下水硝酸盐氮浓度场;陈锁忠等^[64]利用GIS的空间分析功能,研究了基于GIS的空间分布参数自动提取技术,实现了地下水流数值模拟有关参数的自动提取;魏国孝等^[65]运用GIS技术与FEFLOW软件建立了酒泉东盆地地下水系统数值模型,对不同地表径流条件下的地下水系统进行了模拟与分析;Wang等^[66](2008)利用GIS的空间数据处理和分析功能结合VB计算机语言将MapGIS与MODFLOW紧密整合,建立了华北平原地下水流数值模型和网络化的地下水资源动态评价系统;吴春艳^[67]将EGIS系统和MODFLOW集成开发了可视化地下水模拟系统,并通过实际应用验证了该系统建模的便捷性和可行性;Chenini^[68]应用GIS技术和MODFLOW模型对突尼斯中部Maknassy盆地地下水的人工补给对水文地质系统压力的影响进行了数值模拟分析研究;Gaaloul^[69]利用基于GIS的MODFLOW软件包,建立突尼斯东南干旱区El Hicha盆地地下水数值模型,模拟分析了含水层的补给来源和地下水开采对海水入侵的影响。

2 GIS在水文地质领域存在的问题

虽然GIS在水文地质领域的应用已经非常广泛,且对地下水研究具有很大促进作用,但GIS在水文地质领域的应用也存在以下问题。

(1)GIS与地下水数值模型集成方面,目前应用比较广泛的是GIS与地下水数值模型的部分结合,GIS与地下水数值模型的完全结合研究比较少,且不够成熟。

(2)从目前GIS在水文地质领域应用看,GIS真三维或四维的应用实例比较少见。水文地质实体一般都是三维的,而地下水动态和模型运行结果是四维的,GIS的三维或四维可视化功能在水文地质领域的应用是很必要的。

(3)在地下水与地表水联合调度与管理方面,分布式水文模型发挥着重要作用,目前分布式水文模型与GIS的集成不够紧密。

(4)GIS在信息共享、数据标准化方面存在局限性,使不同地区不同GIS系统之间的数据不能方便地共享和转换,妨碍了GIS技术在水文地质领域应用的进一步推广。

3 GIS在水文地质研究中的展望

随着计算机和空间技术的进步以及水文地质方面的发展,今后GIS在水文地质研究中将向以下几个方向发展。

(1)地下水数值模型与GIS和RS的集成。地下水数值模型与GIS和RS的集成。地下水数值模型的离散网格与GIS、RS栅格数据有很多相似之处,二者的有效结合是可以实现的。而且GIS和RS的栅格信息比较丰富,尤其是RS还可以提供实时信息,在植被需水预测、土壤湿度(包气带地下水)研究等方面存在很多优势,将地下水数值模型与GIS和RS结合可以充分利用RS动态监测和GIS空间数据处理与管理功能。将现有的各类计算模型逐步转化为以栅格为空间计算单元的分布式模型,实现地下水数值模型与GIS、RS的深度结合,是今后水文地质领域的研究重点之一。

(2)基于GIS的地下水系统真三维或四维可视化研究,包括水文地质条件、地下水动态和模型运行结果的真三维或四维显示。这不仅要求开发出可以实现三维以及四维空间分析以及显示等功能的GIS专业软件,还需要真三维水文地质概念模型和数学模型与之配套。

(3)GIS与分布式水文模型的集成。在地下水与地表水联合调度与管理方面,分布式水文模型发挥着重要作用,目前分布式水文模型与GIS的集成不够紧密,将GIS与分布式水文模型和地下水模型紧密结合,是今后GIS在地下水与地表水联合调度方面的重点研究方向。

(4)WEBGIS技术的应用。随着网络技术的发展,网络地理信息系统(WEBGIS)技术受到越来越多的地下水研究人员的关注。WEBGIS通过建设标准化数据库,实现各种地下水数据的网络共享,使相关部门和研究人员能够方便快捷地获取区域甚至全国范围内的地下水信息数据,有利于在更大范围开展地下水资源评价工作。

(5)将地下水系统纳入数字流域,综合运用3S(GIS、RS和GPS)、虚拟现实(VR)、专家系统(ES)、决策支持(DSS)等高新技术,建立流域水资源综合管理评价系统,实现各种信息的多维可视化显示、查询和输出,将地下水系统和地表水系统在计算机上虚拟再现,实现流域水资源的统一管理。

(6)基于GIS的地下水模型与MATLAB等开发环境结合也是今后的发展趋势。MATLAB由于其强大的数据处理能力和简单易懂的程序语言,能

够有效地编写出地下水模型算法,并与 GIS 有机结合,能使地下水模拟更加直观和高效。

4 结语

地理信息系统(GIS)已广泛应用于水文地质领域,在地下水资源评价、地下水资源管理、地面沉降、地下水水质评价及污染物分析、水文地质调查、地下水保护,以及 GIS 与数值模拟技术的结合等方面都取得了有益的成果。目前 GIS 的应用使地下水资源的评价和管理更加系统化、信息化,使 GIS 与地下水模型更加集成化,使地下水的水质评价及污染物分析更可视化,使水文地质调查更高效,也为开采地下水引起的地面沉降研究和地下水保护研究提供了一种有效手段。未来 GIS 在水文地质领域的应用研究应加强 GIS 与地下水模型及分布式水文模型的集成研究、基于 GIS 的地下水系统真三维或四维可视化研究、网络 GIS 技术的应用、以及流域水资源综合管理评价系统的建立。

参考文献(References):

- [1] 袁笑一,汪晓军,潘伟斌. GIS 技术及其在地下水领域的应用[J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(S1): 859-861. (YUAN Xiaoyi, WANG Xiaojun, PAN Weibin. GIS technique and its application in the field of groundwater study[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2005, 26(S1): 859-861. (in Chinese))
- [2] 曹炳媛,郝明林,夏红艳. GIS 在地下水资源评价中的应用-以河西走廊黑河中游为例[J]. 水文地质工程地质, 2007, (5): 85-89. (CAO Bingyuan, HAO Minglin, XIA Hongyan. The closely related combination of GIS in groundwater resources evaluation-taking the middle reach of Heihe river in Hexi corridor as an example[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2007, (5): 85-89. (in Chinese))
- [3] 马明,刘洪禄,张久川,等. GIS 技术在地下水资源评价研究中的应用[J]. 灌溉排水学报, 2006, 25(5): 85-88. (MA Ming, LIU Honglu, ZHANG Jiuchuan, et al. Application base on GIS in groundwater resource assessment[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2006, 25(5): 85-88. (in Chinese))
- [4] 降亚楠,魏晓妹,陈静,等. 基于 GIS 的灌区地下水资源综合评价研究[J]. 灌溉排水学报, 2008, 27(5): 90-93. (JIANG Yanan, WEI Xiaomei, CHEN Jing, et al. Comprehensive assessment of groundwater resources in irrigated area based on GIS[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2008, 27(5): 90-93. (in Chinese))
- [5] 殷嘉霖. 基于 GIS 与统计的地下水埋深模拟研究-以宁夏西吉县葫芦河流域为例[D]. 兰州: 兰州大学, 2013. (YIN Jialin. Using GIS and statistics to simulate the groundwater depth: a case study of Huluhu river basin in Xiji country, Ningxia[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2013. (in Chinese))
- [6] 王亚鑫. 基于 ArcGIS Engine 的地下水均衡研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2013. (WANG Yaxin. Research on groundwater balance based on ArcGIS engine[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2013. (in Chinese))
- [7] Portoghesi I, Uricchio V, Vurro M. A GIS tool for hydrogeological water balance evaluation on a regional scale in semiarid environments[J]. Computers & Geosciences, 2005, 31(1): 15-27.
- [8] Poulsen D L, Simmons C T, La Salle C L G, et al. Assessing catchment scale spatial and temporal patterns of groundwater and stream salinity[J]. Hydrogeology Journal, 2006, 14(7): 1339-1359.
- [9] Awawdeh M, Obeidat M, Al-Mohammad M, et al. Integrated GIS and remote sensing for mapping groundwater potentiality in the Tulul al Ashaqif, Northeast Jordan[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2014, 7(6): 2377-2392.
- [10] 李门楼,胡成,陈植华. 河北平原区域地下水资源决策支持系统设计与开发[J]. 地球科学, 2002, 27(2): 222-226. (LI Menlou, HU Cheng, CHEN Zhihua. Establishment of decision making support system for groundwater management of Hebei plain[J]. Earth Science, 2002, 27(2): 222-226. (in Chinese))
- [11] 兰瑞. GIS 在太原市地下水资源管理方面的应用研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2005. (LAN Rui. Application and research of GIS in the Taiyuan groundwater resource management[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2005. (in Chinese))
- [12] Dawoud M A, Darwish M M, El-Kady M M. GIS-based groundwater management model for Western Nile Delta[J]. Water Resources Management, 2005, 19(5): 585-604.
- [13] 孙颖. 基于 GIS 的北京市地下水管理信息系统的设计与实现[D]. 长春: 吉林大学, 2004. (SU N Ying. The design and realization of GIS based groundwater management information system of Beijing City[D]. Changchun: Jilin University, 2004. (in Chinese))
- [14] 周念清. 基于 GIS 的徐州市地下水资源管理研究[D]. 南京: 南京大学, 2001. (ZHOU Nianqing. A GIS-based approach to groundwater resources management in Xuzhou City[D]. Nanjing: Nanjing University, 2001. (in Chinese))
- [15] 宫辉力,赵文吉,李小娟,等. 地下水空间信息系统-设计、开发与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006. (GONG Hui li, ZHAO Wenji, LI Xiaojuan, et al. Groundwater Geographic Information System-Design, Development and Application[M]. Beijing: Science Press, 2006. (in Chinese))
- [16] 全琴. 地下水资源管理信息系统设计与实现[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2010. (QUAN Qin. The design and realization of groundwater management information system[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2010. (in Chinese))
- [17] 叶剑锋. 基于混合系统架构的新疆新疆地下水资源信息系统研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2011. (YE Jianfeng. Study on groundwater resources information system in south Xinjiang based on mixing system architecture[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2011. (in Chinese))
- [18] 谈梦月. 基于 GIS 的晋江市浅层地下水功能区划研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2013. (TAN Mengyue. Research on the shallow groundwater functional zoning of Jinjiang based on GIS[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2013. (in Chinese))
- [19] Khodaei K, Nassery H R. Groundwater exploration using remote sensing and geographic information systems in a semi

- arid area (Southwest of Urmieh, Northwest of Iran)[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2013, 6(4): 1229-1240.
- [20] Galef J K. Optimal groundwater management with GIS applications for the Blue Lake aquifer of Humboldt County, California[D]. USA: Humboldt State University, 2006.
- [21] Sarwar A, Eggers H. Development of a conjunctive use model to evaluate alternative management options for surface and groundwater resources[J]. *Hydrogeology Journal*, 2006, 14(8): 1676-1687.
- [22] 尹莹. 基于GIS的浪溪河地表水-地下水相互作用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014. (YIN Ying. Study on the surface water-groundwater interaction in Langxi River based on GIS[D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2014. (in Chinese))
- [23] 王中根, 朱新军, 李尉, 等. 海河流域地表水与地下水耦合模拟[J]. *地理科学进展*, 2011, 30(11): 1345-1353. (WANG Zhong-gen, ZHU Xir-jun, LI Wei, et al. A coupled surface water/groundwater model for Haihe river basin[J]. *Progress in Geography*, 2011, 30(11): 1345-1353. (in Chinese))
- [24] 王伟. 抽取地下水引起的地面沉降可视化研究[D]. 南京: 河海大学, 2006. (WANG Wei. Study on visualization of land subsidence due to pumping groundwater[D]. Nanjing: Hohai University, 2006. (in Chinese))
- [25] 于军. 基于ArcGIS平台的苏锡常地区地面沉降管理信息系统研究[D]. 长春: 吉林大学, 2006. (YU Jun. Management information system of land subsidence in Suxichang Area based on ArcGIS[D]. Changchun: Jilin University, 2006. (in Chinese))
- [26] 姜规模, 韩凤霞. 西安市地面沉降与地下水动态监测信息管理系统应用研究[J]. *工程勘察*, 2010, (6): 44-47. (JIANG Gu-mo, HAN Feng-xia. Application of dynamic monitoring information system on land subsidence and groundwater level in Xi'an[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2010, (6): 44-47. (in Chinese))
- [27] 焦道振, 谢荣安, 杨贤伟. 三维GIS平台的地面沉降地质灾害信息系统研究[J]. *测绘通报*, 2014, (11): 120-122. (JIAO Dao-zhen, XIE Rong-an, YANG Xian-wei. Research on ground settlement geological hazard information system based on 3D GIS platform[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2014, (11): 120-122. (in Chinese))
- [28] 王强. 地面沉降地质灾害时空数据库建设[D]. 西安: 长安大学, 2015. (WANG Qiang. Construction in spatiotemporal database of land subsidence disaster[D]. Xi'an: Chang'an University, 2015. (in Chinese))
- [29] Rahnama M B, Moafi H. Investigation of land subsidence due to groundwater withdrawal in Rafsanjan plain using GIS software[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2009, 2(3): 241-246.
- [30] 段学敏. 基于GIS的沧州地面沉降危险性区划[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2013. (DUAN Xue-min. GIS-based hazard zoning of land subsidence in Cangzhou[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2013. (in Chinese))
- [31] Pradhan B, Abokharima M H, Jebur M N, et al. Land subsidence susceptibility mapping at Kinta Valley (Malaysia) using the evidential belief function model in GIS[J]. *Natural Hazards*, 2014, 73(2): 1019-1042.
- [32] 张永波, 张礼中, 刘光, 等. 基于GIS的地下水水质综合评价模型的设计与开发[J]. *煤田地质与勘探*, 2002, 30(6): 41-43. (ZHANG Yong-bo, ZHANG Li-zhong, LIU Guang, et al. Designing and development of GIS based groundwater quality comprehensive assessment model[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2002, 30(6): 41-43. (in Chinese))
- [33] 栗石军. 基于GIS技术的地下水重金属污染综合风险评价研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2008. (SU Shi-jun. Based on GIS technology groundwater heavy metal pollution synthesis risk assessment research[D]. Changsha: Hunan University, 2008. (in Chinese))
- [34] 马雷, 钱家忠, 赵卫东. 基于GIS的地下水化学类型空间分区方法[J]. *煤炭学报*, 2012, 37(3): 490-494. (MA Lei, QIAN Jia-zhong, ZHAO Wei-dong. GIS based approaches for spatially dividing groundwater chemical types[J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, 37(3): 490-494. (in Chinese))
- [35] 王存政, 于武军, 李建萍, 等. 基于GIS技术的湛江市浅层地下水防污性能分析与评价[J]. *环境工程*, 2012, 30(S2): 582-585. (WANG Cun-zheng, YU Wu-jun, LI Jian-ping, et al. Analysis assessment of shallow groundwater vulnerability in Zhanjiang Area based on GIS[J]. *Environmental Engineering*, 2012, 30(S2): 582-585. (in Chinese))
- [36] 黄金玉, 姜月华, 苏晶文. GIS在地下水污染分析评价中的应用与技巧[J]. *城市勘测*, 2013, (4): 161-163. (HUANG Jiu-yu, JIANG Yue-hua, SU Jiu-wen. GIS application in the analysis and evaluation of groundwater pollution and skills[J]. *Urban Geotechnical Investigation & Surveying*, 2013, (4): 161-163. (in Chinese))
- [37] 吴金权. 基于GIS的岩溶地下水环境评价系统设计—以丰都雪玉洞地下河系统为例[D]. 重庆: 西南大学, 2014. (WU Jiu-quan. Design of karst groundwater environment evaluation system based on GIS For Snow Jade Cave underground river system as an example in Fengdu[D]. Chongqing: Southwest University, 2014. (in Chinese))
- [38] Machiwal D, Jha M K, Mal B C. GIS-based assessment and characterization of groundwater quality in a hard rock hilly terrain of Western India[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2011, 174(1-4): 645-663.
- [39] Kantharaja D C, Lakkundi T K, Basavanna M, et al. Spatial analysis of fluoride concentration in groundwaters of Shivani watershed area, Karnataka state, South India, through geospatial information system[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2012, 65(1): 67-76.
- [40] Sadat-Noori S M, Ebrahimi K, Liaghat A M. Groundwater quality assessment using the Water Quality Index and GIS in Saver Nobaran aquifer, Iran[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 71(9): 3827-3843.
- [41] 周立新, 时坚. GIS技术在1:5万岩溶水文地质综合调查野外工作中的应用以湖南新田河流域为例[J]. *中国岩溶*, 2009, 28(3): 269-274. (ZHOU Li-xin, SHI Jian. Application of GIS to 1:50000 karst hydrogeologic field survey: A case study in Xintian basin, Hunan province[J]. *Arsologica Sinica*, 2009, 28(3): 269-274. (in Chinese))

- [42] 耿杰哲, 毕思文, 张霞. 基于 GIS 的水文地质调查在山西王家岭矿区的应用[J]. 微计算机信息, 2010, 26(12): 176-178. (GENG Jie zhe, BI Si wen, ZHANG Xia. The application of hydrogeological conditions investigation based on GIS in Shanxi Wangjialing coal area[J]. Micro Computer Information, 2010, 26(12): 176-178. (in Chinese))
- [43] 王秀云, 林曼利, 戴洪宝. 基于 GIS 的淮北煤田综合水文地质图的编制[J]. 工程勘察, 2013, (9): 37-41, 46. (WANG Xiuyun, LIN Manli, DAI Hongbao. Analysis on comprehensive hydrogeological map of Huaibei coalfield produced based on GIS[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2013, (9): 37-41, 46. (in Chinese))
- [44] 任化准, 温忠辉, 束龙仓, 等. CrossView 插件在绘制水文地质图中的应用[J]. 水电能源科学, 2009, 27(5): 62-64. (REN Huazhun, WEN Zhonghui, SHU Longcang, et al. Application of CrossView plugin in drawing hydrogeological map[J]. Water Resources and Power, 2009, 27(5): 62-64. (in Chinese))
- [45] 李立军. 吉林省通榆县地下水脆弱性研究[D]. 长春: 吉林大学, 2007. (LI Lijun. Research on groundwater vulnerability in Tongyu of Jilin province[D]. Changchun: Jilin University, 2007. (in Chinese))
- [46] 张保祥, 万力, 余成, 等. 基于熵权与 GIS 耦合的 DRASTIC 地下水脆弱性模糊优选评价[J]. 现代地质, 2009, 23(1): 150-156. (ZHANG Baoxiang, WAN Li, YU Cheng, et al. Fuzzy optimization assessment of DRASTIC groundwater vulnerability based on entropy weight and GIS[J]. Geoscience, 2009, 23(1): 150-156. (in Chinese))
- [47] Babiker I S, Mohamed M A A, Hiyama T, et al. A GIS based DRASTIC model for assessing aquifer vulnerability in Kakamigahara Heights, Gifu Prefecture, central Japan[J]. Science of the Total Environment, 2005, 345(1-3): 127-140.
- [48] Rahman A. A GIS based DRASTIC model for assessing groundwater vulnerability in shallow aquifer in Aligarh, India[J]. Applied Geography, 2008, 28(1): 32-53.
- [49] Siarkos I, Latinopoulos D, Katirtzidou M. Delineating cost effective wellhead protection zones in a rural area in Greece[J]. Water and Environment Journal, 2014(28): 72-83.
- [50] Miller C. The use of a GIS to compare the land areas captured by very basic and complex wellhead protection are models[J]. Journal of Environmental Health, 2005, 68(4): 21-26.
- [51] 张保祥. 黄河流域地下水脆弱性评价与水源保护区划分研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2006. (ZHANG Baoxiang. Groundwater vulnerability assessment and wellhead protection area delineation in Huangshuihe river basin[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2006. (in Chinese))
- [52] 蒋勇军, 袁道先, 谢世友, 等. 典型岩溶农业区地下水水质与土地利用变化分析[J]. 地理学报, 2006, 61(5): 471-481. (JIANG Yongjun, YUAN Daoxian, XIE Shiyu, et al. The groundwater quality and land use change in a typical karst agricultural region[J]. Acta Geographica Sinica, 2006, 61(5): 471-481. (in Chinese))
- [53] 王明新, 吴文良, 刘文娜. 基于 GIS 和 BP 神经网络的农区地下水硝态氮含量分布特征分析[J]. 农业工程学报, 2006, 22(12): 39-43. (WANG Mingxin, WU Wenliang, LIU Wenana. Spatial analysis of groundwater NO₃-N concentration in agriculture dominated regions based on GIS-based BPNN[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(12): 39-43. (in Chinese))
- [54] 金爱芳, 张旭, 李广贺. 地下水源地污染源危害性评价方法研究[J]. 中国环境科学, 2012, 32(6): 1075-1079. (JIN Aifang, ZHANG Xu, LI Guanghe. Study on the hazard assessment method of pollution sources in groundwater source fields[J]. China Environmental Science, 2012, 32(6): 1075-1079. (in Chinese))
- [55] Candela L, Wallis K J, Mateos R M. Non point pollution of groundwater from agricultural activities in Mediterranean Spain: the Balearic Islands case study[J]. Environ Geol, 2008, 54: 587-595.
- [56] 王红旗, 周庆涛, 王帅, 等. 基于熵权的 Topsis 方法在地下水源地污染调查优化布点中的应用[J]. 安全与环境学报, 2008, 8(6): 39-42. (WANG Hongqi, ZHOU Qingtao, WANG Shuai, et al. Application of the Topsis method based on entropy weight to the optimal distribution of the investigation samples of the groundwater sources pollution[J]. Journal of Safety and Environment, 2008, 8(6): 39-42. (in Chinese))
- [57] 刘徽, 邓少平, 孙康. 江汉平原地下水位监测网优化设计[J]. 资源环境与工程, 2014, 28(5): 692-696. (LIU Hui, DENG Shaoping, SUN Kang. Optimum design of groundwater level monitoring network in Jianghan Basin[J]. Resources Environment & Engineering, 2014, 28(5): 692-696. (in Chinese))
- [58] 丑述仁, 李丁. GIS 在地下水研究中的应用进展综述[J]. 地下水, 2011, 33(5): 11-13. (CHOU Shuren, LI Ding. Progress of application of GIS in groundwater research[J]. Groundwater, 2011, 33(5): 11-13. (in Chinese))
- [59] 丁继红, 周德亮, 马生忠. 国外地下水模拟软件的发展现状与趋势[J]. 勘察科学技术, 2002, (1): 37-42. (DING Jihong, ZHOU Deliang, MA Shengzhong. The state of art and trends of development of groundwater modeling software abroad[J]. Survey Science and Technology, 2002, (1): 37-42. (in Chinese))
- [60] 北京水淼国际科技有限公司. Visual MODFLOW 产品手册[OL]. <http://new.bwil.com.cn/software>, 2014. (Beijing Water International. Visual MODFLOW product manual[OL]. <http://new.bwil.com.cn/software>, 2014. (in Chinese))
- [61] 宁立波, 董少刚, 马传明. 地下水数值模拟的理论与实践[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2010: 22-46. (NING Libo, DONG Shaogang, MA Chuaming. Theory and practice of numerical simulation of groundwater[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2010: 22-46. (in Chinese))
- [62] Strassberg G, Jones N L, Maidment D R. Arc Hydro Groundwater: GIS for Hydrogeology[M]. Redlands: Esri Press, 2011: 1-160.
- [63] 宫辉力, 尹连旺, 赵文吉, 等. 基于 GIS 技术的浅层地下水硝酸盐氮浓度场数值仿真[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(6): 1254-1256. (GONG HuiLi, YIN Lianwang, ZHAO Wenji, et al. Numerical emulation of the NO₃- concentration field of groundwater system[J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(6): 1254-1256. (in Chinese))

(下转第 131 页)

- [7] 陈红江, 李夕兵, 刘爱华. 矿井突水水源判别的多组逐步 Bayes 判别方法研究[J]. 岩土力学, 2009, 12, 30(12): 3655-3659. (CHEN Hong jiang, LI Xibing, LIU Aihua. Studies of water source determination method of mine water inrush based on Bayes' multi-group stepwise discriminant analysis theory[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 12, 30(12): 3655-3659. (in Chinese))
- [8] 黄平华, 陈建生. 基于多元统计分析的矿井突水水源 Fisher 识别及混合模型[J]. 煤炭学报, 2011, 36(增1): 131-136. (HUANG Pinghua, CHEN Jiansheng. Fisher identify and mixing model based on multivariate statistical analysis of mine water inrush sources[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(Supp. 1): 131-136. (in Chinese))
- [9] 李培. 基于 PCA-ELM 的预测模型在煤矿突水预测中的应用[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014. (LI Pei. The application of forecasting model based on PCA-ELM in coal mine water burst prediction[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014. (in Chinese))
- [10] GB/T 5750-2006. 生活饮用水标准检验法[S]. 2007(GB/T 5750-2006. Standard examination methods for drinking water [S]. 2007. (in Chinese))
- [11] Todd D K. Groundwater Hydrology (2nd edition)[M]. New York: Wiley, 1980.
- [12] 唐启义. DPS 数据处理系统: 实验设计、统计分析及数据挖掘[M]. 北京: 科学出版社, 2010. (TANG Qiyi. DPS data processing system: experimental design, statistical analysis and data mining[M]. Beijing: Science Press, 2010 (in Chinese))
- [13] Baeza C, Corominas J. Assessment of shallow landslide susceptibility by means of multivariate statistical techniques[J]. Earth Surface Processes Landforms, 26(12): 1251-1263.
- [14] Carroll S, Goonetilleke A. Assessment of high density of onsite wastewater treatment systems on a shallow groundwater coastal aquifer using PCA[J]. Environmetrics, 2005, 16: 257-274.
- [15] Cloutier V, Lefebvre R, Therrien R, Savard M M. Multivariate statistical analysis of geochemical data as indicative of the hydro geochemical evolution of groundwater in a sedimentary rock aquifer system[J]. Journal of Hydrology, 2008, 353: 294-313.
- [16] Koklu R, Sengorur B, Topal B. Water quality assessment using multivariate statistical methods: a case study: Melen River System (Turkey) [J]. Water Resource Management, 2010, 24: 959-978.
- [17] Koonce J E, Yu Z, Farnham I M, et al. Geochemical interpretation of groundwater flow in the southern Great Basin[J]. Geosphere, 2006, 2: 88-101.
- [18] Yidana S M, Banoeng Yakubo B, Akabzaa T M. Analysis of groundwater quality using multivariate and spatial analyses in the Ketabasin[J]. Journal of African Earth Sciences, 2010, 58: 220-234.
- [19] 杨平恒, 袁道先, 袁文昊, 等. 以 PCA 揭示降雨期间岩溶地下水文地球化学的形成[J]. 中国科学杂志社, 2010, 55(9): 788-797. (YANG Pingheng, YU AN Daoxian, YU AN Weirhao, et al. Formations of groundwater hydrogeochemistry in a karst system during storm events as revealed by PCA[J]. Chinese Sci Bull, 2010, 55(9): 788-797. (in Chinese))
- [20] WU Jiarhua, LI Peiyue, QIAN Hui. Using correlation and multivariate statistical analysis to identify hydrogeochemical processes affecting the major ion chemistry of waters: a case study in Laoheba phosphorite mine in Sichuan, China[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2014, 7: 3973-3982.
- [21] Wishart D. An algorithm for hierarchical classifications[J]. Biometrics 1969, 25(1): 165-170
- [22] Piper A M. A Graphic Procedure in the Geochemical Interpretation of Water Analysis [J]. United States Geological Survey, Washington D. C. 1953.
- [23] 沈照理. 水文地球化学基础[M]. 北京: 地质出版社, 1993. (SHEN Zhaoli. Hydrogeochemistry [J]. Beijing: Geological Publishing House, 1993. (in Chinese))

(上接第 122 页)

- [64] 陈锁忠, 徐网谷, 张磊. 基于 GIS 的地下水数值模拟参数自动提取[J]. 水利学报, 2005, 36(11): 45-50. (CHEN Suozhong, XU Wanggu, ZHANG Lei. Automatic pick-up of groundwater flow parameters for numerical simulation by means of GIS[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(11): 45-50. (in Chinese))
- [65] 魏国孝, 王德军, 王刚, 等. GIS 技术和 FEFLOW 在酒泉东盆地地下水系统数值模拟中的应用[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2007, 43(6): 1-6. (WEI Guoxiao, WANG Dejun, WANG Gang, et al. Application of GIS technique and FEFLOW to numerical simulation of groundwater system in Jiuquan East Basin[J]. Journal of Lanzhou University: Natural Sciences, 2007, 43(6): 1-6. (in Chinese))
- [66] Wang S Q, Shao J L, Song X F, et al. Application of MODFLOW and geographic information system to groundwater flow simulation in North China Plain, China[J]. Environ Geol, 2008, 55: 1449-1462.
- [67] 吴春艳. 基于 GIS 的地下水模拟系统及可视化展示系统研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2009. (WU Chunyan. Research on groundwater modeling system and visualization system based on GIS[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2009. (in Chinese))
- [68] Chenini I, BenMammou A. Groundwater recharge study in arid region: An approach using GIS techniques and numerical modeling [J]. Computers & Geosciences, 2010, 36(6): 801-817.
- [69] Gaaloul N. GIS-based numerical modeling of aquifer recharge and saltwater intrusion in arid southeastern Tunisia[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2014, 19(4): 777-789.